

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

УДК 656.6:616-036

DOI <https://doi.org/10.33082/td.2025.3-26.07>

ВИЗНАЧЕННЯ СКЛАДУ ФЛОТУ ТА ЙОГО РОЗПОДІЛ ЗА ЛІНІЯМИ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ КОНТЕЙНЕРОПОТОКІВ

С.П. Онищенко¹, О.М. Мельник², О.Л. Дрожин³, Ю.А. Бондаренко⁴

¹ д-р екон. наук, професор,
професор кафедри «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень»,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-7528-4939

² д-р техн. наук, професор, професор кафедри «Судноводіння та морська безпека»,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0001-9228-8459

³ канд. техн. наук, доцент,
доцент кафедри «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень»,
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна,
ORCID ID: 0000-0002-9695-9296

⁴ Phd, Чорноморська круїнгова компанія ОСКАР,
ORCID ID: 0000-0001-8393-1481

Анотація

Вступ. Планування складу флоту, який відповідає цілям та конкурентоспроможності компанії-перевізника, а також сучасним тенденціям ринку контейнерних перевезень, базується на вивченні контейнеропотоків з урахуванням їх невизначеності. Це формує інформаційне підґрунтя для прийняття рішень щодо структури флоту та його роботи. Ці рішення також передбачають розгляд доцільності функціонування лінійних сервісів загалом і закріплення за ними суден зокрема. **Результати.** У рамках цього дослідження запропоновано математичну модель для стратегічного рівня управління, де період часу, що розглядається, становить рік та більше. У складі флоту – власні та пропоновані для тайм-чартерної оренди судна, тому змінні моделі відображають відповідні умови – яке судно чи які судна працюють на певній лінії, судна як власні, так й орендовані. Цільова функція моделі – загальний прибуток від експлуатації суден, який враховує, крім прибутку від роботи власних та орендованих суден на лініях, також прибуток від власних суден, які пропонується віддати у тайм-чартерну оренду з урахуванням економічної доцільності. Обмеження моделі враховують: забезпечення обсягу перевезень у діапазоні від песимістичного до оптимістичного рівня між портами лінії; припустиму кількість орендованих у тайм-чартер суден; забезпечення певного рівня ефективності роботи кожного судна на лініях. Результати оптимізації надають склад флоту та розподіл суден за лініями, що розглядаються. **Висновки.** Запропонована математична модель оптимізації

складу флоту та його розподілу за лініями є достовірною з урахуванням відповідності результатів вхідним даним та адекватної реакції результатів на зміни вхідних даних. Ця модель, як розвиток існуючих моделей, не суперечить результатам попередніх досліджень, які створили відповідну теоретичну базу для вказаного розвитку, що також підтверджує її достовірність. Результати оптимізації утворюють базу для прийняття рішень, даючи змогу експериментувати «що, якщо» з рівнем фрахтових ставок, оперативних витрат суден, обсягів роботи, вартістю тайм-чартерної оренди тощо.

Ключові слова: контейнерні перевезення, морські перевезення, попит, обсяги перевезень, ефективність, оптимізація, невизначеність, моделювання, контейнеромісткість, лінійний сектор судноплавства, провізна здатність

FLEET OPTIMIZATION AND ITS DISTRIBUTION ON THE LINES UNDER CONTAINER FLOWS UNCERTAINTY

S.P. Onyshchenko¹, O.M. Melnyk², O.L. Drozhzhyn³, Y.A. Bondarenko⁴

¹ Doctor of Economics, professor,
Professor of the Department “Fleet Operations and Shipping Technology”,
Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-7528-4939

² Doctor of Tech.Sc., professor,
professor of the Department “Navigation and Maritime Safety”,
Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0001-9228-8459

³ Ph.D. Assoc.Prof.,
Associate Professor of the Department “Fleet Operation and Shipping Technology”,
Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine,
ORCID ID: 0000-0002-9695-9296

⁴ Phd, Black Sea Crewing Company OSCAR
ORCID ID: 0000-0001-8393-1481

Summary

Introduction. Planning the fleet composition, which corresponds to the goals and competitiveness of the carrier company, as well as modern trends in the container transportation market, is based on the study of container flows, taking into account their uncertainty. This forms the information basis for making decisions regarding the structure of the fleet and its operation. These decisions also involve considering the feasibility of operating liner services in general and assigning vessels to them, in particular. **Results.** A mathematical model for the strategic management level is proposed, where the period of time under consideration is a year or more. The fleet includes both own and time-charter vessels, so the model variables reflect the relevant conditions – which vessel or vessels operate on a certain line, both own and leased vessels. The target function of the model is the total profit from the operation of vessels, which takes into account, in addition to the profit from the operation of own and leased vessels on the lines, also the profit from own vessels that are proposed to be leased on time-charter; taking into account economic feasibility. The model limitations take into account: ensuring the volume of transportation in the range from pessimistic to optimistic levels between the ports of the lines; the permissible number of vessels leased on time-charter; ensuring a

certain level of efficiency of each vessel on the lines. The optimization results provide the fleet composition and distribution of vessels on the lines. **Conclusions.** The proposed mathematical model for optimizing the fleet composition and its distribution on the lines is reliable, taking into account the compliance of the results with the input data and the adequate response of the results to changes in the input data. This model, as a development of existing models, does not contradict the results of previous studies that created an appropriate theoretical basis for the specified development, which also confirms its reliability. The optimization results form a basis for decision-making, allowing for “what-if” experiments with the level of freight rates, operational costs of vessels, work volumes, the cost of time charter, etc.

Key words: container transportation, maritime transportation, demand, transportation volumes, efficiency, optimization, uncertainty, modelling, container capacity, linear shipping sector, carrying capacity.

Вступ. Індустрія сучасного судноплавства стикається зі складним середовищем, що характеризується нерівномірною та незбалансованою потужністю в різних сегментах. Геополітичні фактори, зміни маршрутів руху суден, старіння флоту, відносно помірний портфель замовлень на судна, суднобудівні обмеження [1], основна надлишкова місткість контейнеровозів і реструктуризація на ринку лінійних перевезень є факторами, які визначають перспективи судноплавної галузі загалом і контейнерного сектору зокрема. Крім того, сучасні вимоги щодо безпеки судноплавства та його екологічності [2; 3] обґрунтовують перегляд стратегій розвитку судноплавних компаній.

Планування складу флоту, який відповідає цілям і конкурентоспроможності компанії-перевізника, а також сучасним тенденціям ринку контейнерних перевезень, базується на вивченні контейнеропотоків з урахуванням їх невизначеності [4; 5]. Це формує інформаційне підґрунтя для прийняття рішень щодо структури флоту та його роботи. Ці рішення також передбачають розгляд доцільності функціонування лінійних сервісів загалом і закріплення за ними суден зокрема.

Постановка проблеми. Під складом флоту розуміється насамперед множина суден із певними характеристиками – у цьому випадку контейнеромісткостей. Ця множина складається з власних та орендованих суден, що також формує відповідну структуру. Слід зазначити, що навіть у компаній-«гігантів» сектору контейнерних перевезень (Maersk, MSC тощо) значну частку в структурі флоту займають орендовані судна, що надає можливість гнучкого управління флотом з погляду контейнеромісткості та його розподілу: зі зменшенням попиту на окремих напрямках доцільним є заміна суден значної контейнеромісткості на меншу, що зручніше й ефективніше робити, оперуючи орендованими суднами. Тому частка орендованих суден у структурі флоту компаній, з одного боку, надає можливість гнучкого його розподілу, з іншого – зменшує як комерційні, так й інвестиційні ризики. В умовах зростання попиту тайм-чартерна оренда забезпечує швидке поповнення флоту [6] та надає можливість розширення присутності на ринку в умовах, коли будівництво нових суден потребує часу та займає до декількох років.

Отже, центральне місце в управлінні роботою флотом належить розподілу суден за ринками, лініями, схемами, системами доставки, довгостроковими контрактами [6–10]. Задачі розподілу суден за напрямками перевезень (схемами перевезень) є класичними для судноплавства й розглядалися ще за радянських часів у вітчизняних дослідженнях у різних постановках – за умов освоєння вантажопотоків або ні. Переважно задачі того періоду не передбачали оренди суден, а тільки придбання, що в умовах планової економіки розглядалась як окрема задача, а в «розподільних» задачах (таку назву вони отримали у спеціальній літературі) здійснювався лише їх розподіл за схемами роботи.

Сучасні дослідження вже орієнтуються на можливість оренди суден і врахування цього в рамках оптимізаційних моделей (наприклад, [6]). Як предмет розподілу розглядалися: напрями роботи [7], системи доставки вантажів [2], довгострокові фрахтові контракти [9]. Що стосується невизначеності, то вона також враховувалась у деяких роботах. Наприклад, у [9] довгострокові контракти характеризувалися нечіткими множинами, що призводило до розгляду інтервальних значень окремих показників в оптимізаційній моделі, але ж знаходження рішення за допомогою цієї моделі потребує використання спеціальних алгоритмів і створення відповідного програмного забезпечення. У [6] щодо розподілу суден за системами доставки вантажів акцентувалась увага на невизначеності фрахтових ставок, тому в цільовій функції оптимізаційної моделі враховані ризики можливих втрат судновласника з урахуванням підвищення рівня фрахтових ставок порівняно із запланованим.

У зарубіжних джерелах значна увага приділяється формуванню та оптимізації маршрутів (наприклад, [11–13]), розкладу роботи суден [14; 15] та розподілу порожніх контейнерів [16; 17]. Але ж у більшості джерел під маршрутом розуміється фізичний шлях руху судна з урахуванням географічних особливостей регіону. У [11] розглядалася задача розподілу суден-контейнеровозів за лініями, проте модель, яка запропонована, не враховує невизначеності контейнеропотоків, а також можливості «гнучкого» управління флотом з погляду зміни його структури за допомогою тайм-чартерної оренди.

Слід констатувати, що, незважаючи на значну увагу, приділену питанням контейнерних перевезень, сучасні дослідження оптимізації розподілу суден орієнтовані переважно на балкерні судна, тому не враховують особливостей контейнерних перевезень, невизначеності контейнеропотоків та, як наслідок, обсягів перевезень; отже, задача оптимізації складу флоту та його розподілу між лініями потребує певного вивчення з урахуванням вищезгаданих зауважень.

Мета статті. З огляду на вищезазначене метою цього дослідження є забезпечення ефективності роботи суден-контейнеровозів на базі оптимізаційної моделі формування складу флоту та його розподілу за лініями з урахуванням невизначеності контейнеропотоків. Досягнення мети передбачає розробку й експериментальну перевірку моделі, яка враховує особливості роботи суден-контейнеровозів на лініях і результати попередніх досліджень, пов'язаних з аналогічними задачами для інших секторів судноплавства.

Результати. З урахуванням результатів [6; 8] у цьому дослідженні розглядається математична модель задачі оптимізації складу флоту та його розподілу по лініях з урахуванням невизначеності обсягів перевезень.

Введемо позначення:

$n = \overline{1, N}$ – маршрути лінійних сервісів;

$s = \overline{1, S}$ – судна компанії, що розглядаються, ці судна вважаємо власністю компанії;

$s' = \overline{1, S'}$ – судна, які розглядаються як претенденти на поповнення флоту шляхом тайм-чартерної оренди;

$X_{sn} = \{0, 1\}, s = \overline{1, S}, n = \overline{1, N}$ – змінні моделі, які приймають значення 1, якщо судно s працюватиме на маршруті лінії n , 0 – у протилежному випадку;

$Y_s = \{0, 1\}, s = \overline{1, S}$ – змінні моделі, які приймають значення 1, якщо це судно s слід віддати в тайм-чартерну оренду;

$Y_{s'} = \{0, 1\}, s' = \overline{1, S'}$ – змінні моделі, які приймають значення 1, якщо це судно s' слід взяти в тайм-чартерну оренду;

$X_{s'n} = \{0, 1\}, s' = \overline{1, S'}, n = \overline{1, N}$ – змінні моделі, які приймають значення 1, якщо судно s' працюватиме на маршруті лінії n , 0 – у протилежному випадку.

Враховуючи специфіку завдання, введемо до розгляду такі показники, що характеризують роботу суден на лініях, передусім провізну здатність суден $P_n^s, P_n^{s'}, n = \overline{1, N}, s' = \overline{1, S'}, s = \overline{1, S}$ (тис. TEU), при цьому розглядаються не всі судна, а тільки їх частина, тобто для розрахунків цього показника приймаються судна $s \in \Omega_s^n, s' \in \Omega_{s'}^n$, де Ω_s^n та $\Omega_{s'}^n$ – множини суден, які є доцільними для використання на лінії $n = \overline{1, N}$. Ця доцільність встановлюється на етапі первинного аналізу флоту та ліній з урахуванням результатів їх роботи в попередній період часу, а також з урахуванням прогнозів. Також слід зазначити, що в класичному варіанті розрахунку провізної здатності враховуються завантаження судна, час рейсу й експлуатаційний період.

Зазвичай максимізація прибутку є основним критерієм [6; 9; 10] для формування складу флоту, якщо інше не передбачено стратегіями розвитку компанії – наприклад, якщо компанія намагається сформувати нову клієнтську базу та здійснити закріплення на певному географічному сегменті в новому напрямку перевезень в умовах, коли попит має перспективу зростання, але на цьому етапі його рівень не дає змоги отримувати необхідний рівень прибутку. Проте згадана ситуація є окремим випадком, тому вважаємо, що максимізація прибутку є критерієм під час вирішення завдання, що розглядається, – визначення складу флоту та його розподілу з урахуванням невизначеності обсягів перевезень.

Отже, для суден, що є власністю компанії, прибуток F_s від роботи на лініях формується таким чином:

$$F_s = \sum_{n=1}^N F_{sn} - R_s^{fix}, s = \overline{1, S}, \quad (1)$$

$$F_{sn} = k_n \cdot P_n^s \cdot f_n - R_{sn}^{3M}, s = \overline{1, S}, n = \overline{1, N}, \quad (2)$$

де F_{sn} – економічний результат роботи судна на певній лінії без врахування постійних витрат; R_s^{fix} – постійні витрати судна $s = \overline{1, S}$ за рік; R_{sn}^{3M} – змінні витрати судна $s = \overline{1, S}$ за рік на лінії $n = \overline{1, N}$; P_n^s – провізна здатність судна

$s = \overline{1, S}$ за рік на лінії $n = \overline{1, N}$; f_n – усереднене значення фрахтової ставки (дол./TEU) на лінії $n = \overline{1, N}$; k_n – коефіцієнт, який враховує середній рівень використання контейнеромісткості, прийнятий для визначення очікуваного середнього значення результату роботи судна.

Слід зауважити, що змінні витрати R_{sn}^{3M} враховують портові збори, паливо, вартості проходження каналів і протоків, що визначається специфікою лінії (складу портів та маршруту); постійні витрати R_s^{fix} (страхування, планові ремонти, менеджмент тощо) не залежать від лінії, а визначаються суто характеристиками судна. F_{sn} не є прибутком, тому що не враховує постійних витрат, у деяких зарубіжних джерелах цей показник визначається як «заробіток суден».

Аналогічні показники визначаються для орендованих суден:

$$F_{s'} = \sum_{s'=1}^{S'} F_{s'n} - R_{s'}^{tch}, s' = \overline{1, S'}, \quad (3)$$

$$F_{s'n} = k_n \cdot P_n^{s'} \cdot f_n - R_{s'n}^{3M}, s' = \overline{1, S'}, n = \overline{1, N}, \quad (4)$$

де $F_{s'n}$ – економічний результат роботи судна на певній лінії без врахування постійних витрат; $R_{s'n}^{3M}$ – змінні витрати судна $s' = \overline{1, S'}$ за рік на лінії $n = \overline{1, N}$; $R_{s'}^{tch}$ – річні витрати (тис. дол.) відповідно до умов тайм-чартерної оренди згідно ставки оренди $f_{s'}^{tch}$ (дол./добу):

$$R_{s'}^{tch} = f_{s'}^{tch} \cdot T_{s'}^{tch}, \quad (5)$$

де $T_{s'}^{tch}$ – період тайм-чартеру, приймається як річний.

У судноплавстві F_s , F_{sn} , R_{sn}^{3M} , R_s^{fix} , $F_{s'}$, $F_{s'n}$, $R_{s'n}^{3M}$ вимірюються в тис. дол. / тис. євро з урахуванням специфіки прийнятої системи розрахунків.

Слід зазначити, що можливі дві ситуації із суднами компанії: (1) усі вони використовуватимуться на маршрутах або (2) тільки їх частина, виходячи з умов доцільності. Для другої ситуації судна, які недоцільно використовувати, потрібно віддати в тайм-чартерну оренду, що забезпечить компанії додатковий прибуток F'_s (тис. дол.) з урахуванням доходу від тайм-чартерної оренди:

$$F'_s = f_s^{tch} \cdot T - R_s^{fix}, s = \overline{1, S}, \quad (6)$$

де T – період часу, що розглядається (приймаємо як рік з урахуванням попередніх міркувань). Цей прибуток враховується для суден, яким відповідають значення змінних $Y_s = 1$. Слід зазначити, що змінні $Y_s, s = \overline{1, S}$ та $Y_{s'}, s' = \overline{1, S'}$ є допоміжними змінними, які введено в модель для більш зручної практичної реалізації, що обґрунтовується виконанням відповідних експериментальних досліджень, результати їх наведено нижче.

Отже, загальний прибуток компанії від роботи суден складається з трьох складових:

- прибутку F_s від роботи власних суден на лініях згідно з (1)–(2), що в рамках моделі відповідає множині змінних, для яких виконується $\sum_{n=1}^N X_{sn} = 1$ та $Y_s = 0$:

$$\sum_{s=1}^S F_s = \sum_{s=1}^S \left(\sum_{n=1}^N F_{sn} \cdot X_{sn} \right) - R_s^{fix}; \quad (7)$$

• прибутку F_s , від роботи орендованих суден на лініях згідно з (3) – (5), що в рамках моделі відповідає множині змінних, які приймають значення $Y_s = 1$:

$$\sum_{s'=1}^{S'} F_{s'} = \sum_{s'=1}^{S'} \left(\sum_{n=1}^N F_{s'n} \cdot X_{s'n} \right) - R_{s'}^{ich} \cdot Y_{s'}; \quad (8)$$

• прибутку від тайм-чартерної оренди суден F'_s згідно з (6), що в рамках моделі відповідає змінним, для яких виконується $\sum_{n=1}^N X_{sn} = 0$ та відповідно $Y_s = 1$:

$$\sum_{s=1}^S F'_s \cdot Y_s. \quad (9)$$

Отже, цільова функція моделі – максимізація прибутку від роботи суден компанії на лініях з урахуванням як власних суден, так і суден, які орендовано, а також суден у тайм-чартері:

$$\begin{aligned} & \sum_{s=1}^S \left(\sum_{n=1}^N F_{sn} \cdot X_{sn} - R_s^{fix} \right) + \sum_{s'=1}^{S'} \left(\sum_{n=1}^N F_{s'n} \cdot X_{s'n} - R_{s'}^{ich} \cdot Y_{s'} \right) + \\ & + \sum_{s=1}^S F'_s \cdot Y_s \rightarrow \max \end{aligned} \quad (10)$$

Слід зазначити, що постійні витрати для власних суден R_s^{fix} не залежать від того, як працює судно (мається на увазі, працює на лінії чи в тайм-чартері), у разі тайм-чартерної оренди судновласник також покриває ці витрати, тому в (7) та (10) R_s^{fix} не пов'язано зі змінними моделі.

Зауважимо, що цільова функція не враховує наведеного вище розподілу суден на множини Ω_s^n та $\Omega_{s'}^n$ – множини суден, які є доцільними для використання на лінії $n = \overline{1, N}$, тому що в цільовій функції враховуються всі судна та всі лінії. Ці множини мають значення для обмежень, які враховують обсяги перевезень, та будуть розглянуті нижче.

Оскільки для власних суден компанії обов'язковим є вибір однієї з форм експлуатації (робота на лініях або робота в тайм-чартері), перша група обмежень враховує цей факт:

$$\left(\sum_{n=1}^N X_{sn} \right) + Y_s = 1, s = \overline{1, S}, \quad (11)$$

отже, або судно працює на лінії – тоді одна змінна з множини X_{sn} для певного судна $s = \overline{1, S}$ дорівнює одиниці, або судно здається у тайм-чартер – усі відповідні X_{sn} дорівнюють 0, тоді Y_s дорівнює 1.

Аналогічна умова, але з врахуванням факту оренди судна, має місце для відповідної категорії суден:

$$\left(\sum_{n=1}^N X_{s',n} \right) = Y_{s'}, s' = \overline{1, S'}, \quad (12)$$

якщо судно $s' = \overline{1, S'}$ слід орендувати, тоді відповідне значення $Y_{s'}$ дорівнює одиниці, отже, одна зі змінних $X_{s',n}$ має також дорівнювати 1 – судно має працювати за однією з множини ліній. Якщо судно не вибрано для оренди, то значення 0 для відповідних змінних забезпечать також виконання цієї умови, отже, усі відповідні значення $X_{s',n}$ дорівнюватимуть 0.

Традиційним набором обмежень для розподільних задач є [6]:

- обмеження за обсягами перевезень за період, що розглядається;
- обмеження за можливостями оренди суден у тайм-чартер (бажання керівництва компанії);
- забезпечення певного рівня прибутку – мінімальний рівень для припустимого прибутку – як загалом, так і для кожного судна окремо.

Обмеження за кількістю орендованих суден:

$$\sum_{s'=1}^{S'} Y_{s'} \leq W, \quad (13)$$

де W – максимально припустима кількість орендованих суден, це обмеження встановлюється керівництвом компанії.

Слід зауважити, що для власних суден компанії аналогічне обмеження відсутнє, тому що (11) забезпечують охоплення всього флоту компанії (власні судна). Але в разі потреби можливе введення аналогічного обмеження, яке враховує, яка максимальна кількість власних суден є допустимою для задачі в оренду:

$$\sum_{s=1}^S Y_s \leq W^*, \quad (14)$$

До того ж можна врахувати умову «заборони» на здачу власних суден в оренду, трансформуючи відповідним чином (11) та (10):

$$\sum_{n=1}^N X_{sn} = 1, s = \overline{1, S}, \quad (15)$$

$$\sum_{s=1}^S \left(\sum_{n=1}^N F_{sn} \cdot X_{sn} - R_s^{fix} \right) + \sum_{s'=1}^{S'} \left(\sum_{n=1}^N F_{s'n} \cdot X_{s'n} - R_{s'}^{tch} \cdot Y_{s'} \right) \rightarrow \max. \quad (16)$$

У такому випадку $Y_s, s = \overline{1, S}$ не розглядаються.

З урахуванням невизначеності контейнеропотоків обмеження за обсягами перевезень мають такий вигляд:

$$Q''_n \leq \sum_{s \in \Omega_S^n} P_n^s \cdot X_{sn} + \sum_{s' \in \Omega_{S'}^n} P_n^{s'} \cdot X_{s'n} \leq Q'_n, n = \overline{1, N}, \quad (17)$$

де $Q''_n, Q'_n, n = \overline{1, N}$ – відповідно оптимістичний і песимістичний варіант обсягів перевезень (тис. TEU) на лінії [5]; $\sum_{s \in \Omega_S^n} P_n^s \cdot X_{sn}$ – загальна провізна здатність

власних суден компанії на лінії n (тис. TEU); $\sum_{s' \in \Omega_{s'}^n} P_n^{s'} \cdot X_{s'n}$ – загальна провізна здатність орендованих у тайм-чартер суден на лінії n (тис. TEU); $s \in \Omega_s^n$, $s' \in \Omega_{s'}^n$, де Ω_s^n та $\Omega_{s'}^n$ – множини суден, які є доцільними для використання на лінії $n = \overline{1, N}$.

Слід зауважити, що показники провізної здатності й обсяги перевезень орієнтовані на загальний період, що розглядається. На практиці, звісно, контейнеропотоки нерівномірно розподіляються в часі, тому навіть за позитивного прогнозу контейнеропотоків в окремі періоди попит на перевезення буде вищий, ніж в інші; при цьому можлива ситуація, коли контейнеромісткість судна не дає змоги прийняти цю кількість контейнерів, але спрогнозувати це достатньо складно. Крім того, урахування оптимістичного та песимістичного варіантів надає деякий діапазон, який частково враховує такі ситуації.

Також специфікою лінійного судноплавства є те, що зазвичай судна не працюють одразу на декількох лініях, отже, кожне судно пов'язане з певною лінією. Слід зазначити, що в багатьох «класичних» розподільних моделях це не було передбачено, а як змінні використовувалися частки експлуатаційного періоду, що враховувало можливість роботи одного судна на кількох лініях (схемах).

Для комплектування моделі останній етап – формування обмежень на значення змінних моделі:

$$X_{sn} = \{0, 1\}, s = \overline{1, S}, n = \overline{1, N}, \quad (18)$$

$$X_{s'n} = \{0, 1\}, s' = \overline{1, S'}, n = \overline{1, N}, \quad (19)$$

$$Y_s = \{0, 1\}, s = \overline{1, S}, \quad (20)$$

$$Y_{s'} = \{0, 1\}, s' = \overline{1, S'}, \quad (21)$$

Таким чином, вирази (10)–(14), (17)–(21) формують математичну модель, яка встановлює оптимальний склад флоту та здійснює одночасно його розподіл між лініями з урахуванням невизначеності обсягів перевезень на лініях. Цю невизначеність враховано насамперед у відповідних обмеженнях (17), а також під час визначення економічних результатів роботи суден у цільовій функції за допомогою введення коефіцієнтів k_n , які враховують середній рівень використання контейнеромісткості, прийнятий для визначення очікуваного середнього значення результату роботи судна.

Виконано експериментальну перевірку запропонованої математичної моделі за різними варіантами даних, результати підтвердили її достовірність та можливість практичного застосування.

Підводячи підсумок, зазначимо:

1) запропонована математична модель оптимізації складу флоту та його розподілу за лініями є достовірною з урахуванням відповідності результатів вхідним даним та адекватної реакції результатів на зміни вхідних даних;

2) ця модель як розвиток існуючих моделей не суперечить результатам попередніх досліджень, які створили відповідну теоретичну базу для вказаного розвитку, що також підтверджує її достовірність;

3) результати оптимізації утворюють базу для прийняття рішень, даючи змогу експериментувати «що, якщо» з рівнем фрахових ставок, оперативних витрат суден, обсягів роботи, вартістю тайм-чартерної оренди тощо.

Висновки. У рамках цього дослідження запропоновано математичну модель для стратегічного рівня управління, де період часу, що розглядається, становить рік та більше. У складі флоту – власні та пропонувані для тайм-чартерної оренди судна, тому змінні моделі відображають відповідні умови – яке судно чи які судна працюють на певній лінії, судна як власні, так й орендовані. Цільова функція моделі – загальний прибуток від експлуатації суден, який враховує, крім прибутку від роботи власних та орендованих суден на лініях, також прибуток від власних суден, які пропонується віддати в тайм-чартерну оренду з урахуванням економічної доцільності. Обмеження моделі враховують: забезпечення обсягу перевезень у діапазоні від песимістичного до оптимістичного рівня між портами ліній; припустиму кількість орендованих у тайм-чартер суден; забезпечення певного рівня ефективності роботи кожного судна на лініях. Результати оптимізації надають склад флоту та розподіл суден за лініями, що розглядаються.

Слід відмітити, що ця модель є розвитком існуючих математичних моделей «розподільних задач», які в сучасних постановках сформульовано для балкерних суден та які не враховують специфіки контейнерного сектору судноплавства, у тому числі особливостей формування експлуатаційних та економічних показників. Тому розвиток існуючих досліджень полягає у тому, що вказана специфіка й особливості роботи суден-контейнеровозів на лініях враховані в цій моделі, що поширює межі використання існуючих результатів (моделей) на лінійний сектор судноплавства.

ЛІТЕРАТУРА

1. Берестенко В., Онищенко С. Структура та характеристики мультимодальної доставки з позиції цифровізації. *Розвиток транспорту*. 2021. № 4 (11). С. 82–93. DOI: 10.33082/td.2021.4-11.08.
2. Onyshchenko S., Savelieva I., Melnyk O., Koryakin K., Kotenko O. Enhancing Safety and Efficiency in Maritime Ergatic Systems Through Advanced Information Technologies. *Systems, Decision and Control in Energy VII: Volume I: Energy Informatics and Transport*. 2021. P. 295–308.
3. Onishchenko O., Golikov V., Melnyk O., Onyshchenko S., Obertiur K. Technical and operational measures to reduce greenhouse gas emissions and improve the environmental and energy efficiency of ships. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2022. Vol. 116. P. 223–235. DOI: 10.20858/sjsutst.2022.116.14.
4. Решетков Д. М., Онищенко С. П., Павлова Н. Л., Кириллова В. Ю. Сутність, переваги та проблеми автоматизації контейнерних терміналів морських портів. *Вчені записки Таврійського*

- національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2023. Том 34 (73). № 2. С. 194–202. DOI: 10.32782/2663-5941/2023.2.2/33.
5. Бондаренко Ю. А., Онищенко С. П. Структура та невизначеність контейнеропотоків у системі морських перевезень. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2024. Том 35 (74). № 1. С. 139–146. DOI: 10.32782/2663-5941/2024.1.2/23.
 6. Koskina, Y., Onyshenko, S., Drozhzhyn, O., Melnyk, O. Efficiency of tramp fleet operating under the contracts of affreightment. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2023. Vol. 120. P. 137–149. ISSN: 0209-3324. DOI: 10.20858/sjsutst.2023.120.9.
 7. Вишневський Д. О. Методичні основи організації роботи універсальних суден на міжнародних лініях : дис. канд. : 05.22.01. Одеса, 2016. 171 с.
 8. Drozhzhyn O., Koskina Y. The model of container feeder line organization focused on the nature and parameters of external container flows. *Komunikácie*. 2021. Vol. 23 (2). DOI: 10.26552/com.C.2021.2.A94-A102.
 9. Vyshnevskiy D., Vyshnevskaya O., Onyshchenko S. Modeling of the distribution of the vessels' time budget under long-term freight contracts within conditions of uncertainty. *Development of Management and Entrepreneurship Methods on Transport*. 2019. Vol. 69 (4). P. 15–25. DOI: 10.31375/2226-1915-2019-4-15-25.
 10. Кириллова О. В. До питання обґрунтування розподілу контейнеропотоків між суднами, обслуговуючими магістрально-фідерної лінії. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2014. № 2 (11). С. 55–68.
 11. Christiansen M., Fagerholt K., Nygreen B., Ronen, D. Ship routing and scheduling in the new millennium. *European Journal of Operational Research*. 2013. Vol. 228 (3). P. 467–483.
 12. La Scalia G., S. Mancini, L. Adelfio, A. Giallanza. Development of a Vessel Scheduling Optimization Model to improve Maritime Transport sustainability. *Sustainable Futures*. 2023. Vol. 6. 100123. DOI: 10.1016/j.sfr.2023.100123.
 13. Meng Q., Wang S., Andersson H., Thun K. Containership Routing and Scheduling in Liner Shipping: Overview and Future Research Directions. *Transportation Science*. 2014. Vol. 48. P. 265–280. DOI: 10.1287/trsc.2013.046 1.
 14. Henry S.M., Hoffman M.J., Waddell L.A., Muldoon F.M. Holistic fleet optimization incorporating system design considerations. *Naval Research Logistics (NRL)*. 2023. Vol. 70 (7). P. 675–690.
 15. Ksciuk J., Kuhlemann S., Tierney K., Koberstein A. Uncertainty in maritime ship routing and scheduling: A Literature review. *European*

- Journal of Operational Research*. 2023. Vol. 308. Issue 2. P. 499–524. DOI: 10.1016/j.ejor.2022.08.006.
16. Legros B., Bouchery Y., Fransoo J. A. Time-Based Policy for Empty Container Management by Consignees. *Production and Operations Management*. 2019. Vol. 28. P. 1503–1527. DOI: 10.1111/poms.12996.
17. Chien-Chang Chou, Rong-Hua Gou, Chaur-Luh Tsai, Ming-Cheng Tsou, Chun-Pong Wong, Hui-Lin, Yu. Application of a mixed fuzzy decision making and optimization programming model to the empty container allocation. *Applied Soft Computing*. 2010. Vol. 10, Issue 4. P. 1071–1079. DOI: 10.1016/j.asoc.2010.05.008.

REFERENCES

1. Berestenko, V., Onyshchenko, S. (2021). Structure and characteristics of multimodal delivery from the digitalization point of view [Struktura ta kharakterystyky multimodalnoyi dostavky z pozytsiyi tsyfrovizatsiyi]. *Transport development*, 4 (11), 82–93. DOI: 10.33082/td.2021.4-11.0810 [in Ukrainian].
2. Onyshchenko, S., Savelieva, I., Melnyk, O., Koryakin, K., Kotenko, O. (2021). Enhancing Safety and Efficiency in Maritime Ergatic Systems Through Advanced Information Technologies. *Systems, Decision and Control in Energy VII: Volume I: Energy Informatics and Transport*. P. 295–308.
3. Onishchenko, O., Golikov, V., Melnyk, O., Onyshchenko, S., Obertiur, K. (2022). Technical and operational measures to reduce greenhouse gas emissions and improve the environmental and energy efficiency of ships. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 116, 223–235. DOI: 10.20858/sjsutst.2022.116.14.
4. Reshetkov, D.M., Onyshchenko, S.P., Pavlova, N.L., Kirillova, V.Yu. (2023). The essence, advantages and problems of automation of container terminals of seaports [Sutnist, perevahy ta problemy avtomatyzatsiyi konteynernykh terminaliv morskyykh portiv]. *Scientific notes of the Tavria National University named after V.I. Vernadsky. Series: Technical Sciences*, 34 (73), 2, 194–202. DOI: 10.32782/2663-5941/2023.2.2/33 [in Ukrainian].
5. Bondarenko, Yu.A., Onyshchenko, S.P. (2024). Structure and uncertainty of container flows in the maritime transport system [Struktura ta nevyznachenist konteyneropotokiv u systemi morskyykh perevezen]. *Academic notes of the Tavri National University V.I. Vernadskyi. Series: Technical Sciences*, 35 (74), 1, 139–146 [in Ukrainian].
6. Koskina, Y., Onyshenko, S., Drozhzhyn, O., Melnyk, O. (2023). Efficiency of tramp fleet operating under the contracts of affreightment. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 120, 137–149. ISSN: 0209-3324. DOI: 10.20858/sjsutst.2023.120.9.
7. Vyshnevsky, D.O. (2016). Methodical bases of the organization of work of universal vessels on international lines [Metodychni osnovy

- orhanizatsiyi roboty universal'nykh suden na mizhnarodnykh liniyakh]. *Candidate's thesis*. Odesa. 171 p. [in Ukrainian].
8. Drozhzhyn, O., Koskina, Y. (2021). The model of container feeder line organization focused on the nature and parameters of external container flows. *Komunikácie*, 23 (2). DOI: 10.26552/com.C.2021.2.A94-A102.
 9. Vyshnevskiy, D., Vyshnevskaya, O., Onyshchenko, S. (2019). Modeling of the distribution of the vessels' time budget under long-term freight contracts within conditions of uncertainty. *Development of Management and Entrepreneurship Methods on Transport*, 69 (4), 15–25. DOI: 10.31375/2226-1915-2019-4-15-25.
 10. Kirillova, O.V. (2014). On the question of substantiating the distribution of container flows between vessels serving the trunk-feeder line [Do pytannya obgruntuvannya rozpodilu konteyneropotokiv mizh sudnamy, obsluhovuyuchymy mahistralno-fidernoyi liniy]. *Scientific Bulletin of the Kherson State Maritime Academy*, 2 (11), 55–68 [in Ukrainian].
 11. Christiansen, M., Fagerholt, K., Nygreen, B., Ronen, D. (2013). Ship routing and scheduling in the new millennium. *European Journal of Operational Research*, 228 (3), 467–483.
 12. La Scalia, G., Mancini, S., Adelfio, L., Giallanza, A. (2023). Development of a Vessel Scheduling Optimization Model to improve Maritime Transport sustainability. *Sustainable Futures*, 6, 100123. DOI: 10.1016/j.sfr.2023.100123.
 13. Meng, Q., Wang, S., Andersson, H., Thun, K. (2014). Containership Routing and Scheduling in Liner Shipping: Overview and Future Research Directions. *Transportation Science*, 48, 265–280. DOI: 10.1287/trsc.2013.046 1.
 14. Henry, S.M., Hoffman, M.J., Waddell, L.A., Muldoon, F.M. (2023). Holistic fleet optimization incorporating system design considerations. *Naval Research Logistics (NRL)*, 70 (7), 675–690.
 15. Ksciuk, J., Kuhlemann, S., Tierney, K., Koberstein, A. (2023). Uncertainty in maritime ship routing and scheduling: A Literature review. *European Journal of Operational Research*, 308 (2), 499–524. DOI: 10.1016/j.ejor.2022.08.006.
 16. Legros, B., Bouchery, Y., Fransoo, J.A. (2019). Time-Based Policy for Empty Container Management by Consignees. *Production and Operations Management*, 28, 1503–1527. DOI: 10.1111/poms.12996.
 17. Chien-Chang Chou, Rong-Hua Gou, Chaur-Luh Tsai, Ming-Cheng Tsou, Chun-Pong Wong, Hui-Lin Yu. (2010). Application of a mixed fuzzy decision making and optimization programming model to the empty container allocation. *Applied Soft Computing*, 10 (4), 1071–1079. DOI: 10.1016/j.asoc.2010.05.008.

Дата першого надходження рукопису до видання: 24.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 28.08.2025

Дата публікації: 30.10.2025